

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И  
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПО ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ

---

На правах рукописи

УДК 528.02:535.5

БЕЛОВ Игорь Юрьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ  
ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ  
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 05.24.01 – геодезия

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 1995

Работа выполнена в Государственном университете по землеустройству.

Научный руководитель — Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации  
доктор технических наук,  
профессор  
Ю.Г. Батраков

Официальные оппоненты — доктор технических наук,  
профессор  
А.Н. Голубев

кандидат технических наук  
Ю.С. Галкин

Ведущая организация — Центральный научно-исследовательский институт геодезии,  
аэросъемки и картографии  
имени Ф.Н. Красовского

Защита состоится "28" дек 1995 г. в "11" часов на заседании специализированного совета К.120.59.01 в Государственном университете по землеустройству, по адресу Москва, ул. Казакова 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного университета по землеустройству.

Автореферат разослан "27" нояб 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук, профессор



А.Н. Сухов

## Общая характеристика работы.

*Актуальность работы.* Проблемой влияния атмосферы на геодезические измерения занимались многие ученые — Изотов А.А., Юношев Л.С., Яковлев Н.В., Островский А.Л., Куштин И.Ф., Виноградов В.В. и другие. В светодальнометрии наиболее надежные результаты дают инструментальные методы, реализованные Прилепиным М.Т., Голубевым А.Н. в приборах с двумя и тремя частотами излучения. Однако сегодня в практике высокоточных геодезических измерений широко распространены однолучевые светодальномеры, что определяет актуальность разработки более точных методов учета влияния воздушной среды на измерения дальности такими инструментами. Особенности предлагаемой диссертантом методики определяются следующими требованиями, учитывавшимися при ее разработке:

- Дальность измеряется светодальномером с одной частотой излучения.
- Расширение состава полевых измерений нежелательно.
- Следует исключить необходимость явного рассмотрения влияния подстилающей поверхности на результаты измерений.

*Целью* настоящей работы является разработка метода учета влияния атмосферных условий на дальномерные измерения, обеспечивающего повышение точности благодаря использованию при обработке дополнительной информации об эмпирических связях между метеопараметрами, измеряемыми в конечных точках трассы. Предлагаемый в данной работе подход основан на установлении связи между среднеинтегральным индексом коэффициента преломления воздуха в процессе наблюдений и рядом параметров, определяемых в одной или обеих конечных точках трассы. Знание характера этой связи позволяет редуцировать результаты наблюдений на условия адиабатического равновесия атмосферы, при котором становится доступным точное моделирование переноса излучения.

*Научная новизна* работы заключается в следующем:

- Впервые использован аппарат множественной регрессии для определения характера зависимости среднеинтегрального индекса коэффициента преломления воздуха от ряда параметров, получаемых из произвольного набора измеряемых величин.

- На основе моделирования распространения светового луча получена формула рефракционной поправки в измеренную длину линии для условий адиабатического равновесия атмосферы.
- Разработана методика учета влияния внешней среды на геодезические светодальномерные измерения, использующая регрессионный анализ для редуцирования результатов наблюдений на условия изотермии атмосферы.

По различным вариантам разработанной методики обработано 1368 измерений, полученных при участии автора на геодинамическом полигоне Института высоких температур АН СССР (г. Бешкек) в разные сезоны года при различных погодных условиях.

*Достоверность* полученных результатов подтверждается:

1. согласием теоретических выводов и практических результатов;
2. согласием результатов, полученным по различным вариантам методики, между собой;
3. апробацией основных результатов исследования на научных симпозиумах.

*Практическая ценность работы.* Предлагается доведенная до практического применения методика обработки светодальномерных измерений при режимных наблюдениях на геодинамических полигонах, а также при развитии геодезических сетей специального назначения. Гибкость методики позволяет использовать ее в различных вариантах, различающихся по составу и полноте геодезических и метеорологических измерений.

*Апробация работы.* Основные результаты работы докладывались на Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах в 1991 году и на Межреспубликанском симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах в 1993 году (г. Томск).

*На защиту выносятся следующие результаты:*

1. Применение регрессионного анализа для определения характера зависимости среднеинтегрального индекса коэффициента преломления воздуха от ряда величин, получаемых из геодезических и метеорологических измерений.

2. Формула рефракционной поправки в измеренную длину линии для условий адиабатического равновесия атмосферы.
3. Методика учета внешних факторов на результаты геодезических светодальномерных измерений, основанная на редуцировании результатов наблюдений на условия адиабатического равновесия атмосферы.

*Структура и объем диссертации.* Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Общий объем диссертации 141 страница. В диссертации представлены 31 таблица и 25 рисунков. Список литературы включает 55 наименований, из них 16 — на иностранных языках.

### Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы основные задачи и положения, выносимые на защиту. Приведены основные данные, характеризующие диссертацию.

В первой главе "Учет влияния атмосферных условий в работах по светодальнометрии" освещены основные подходы к учету влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений.

В разделе 1.1 описан предложенный М.Т. Прилепиным дисперсионный метод, основанный на дисперсии электромагнитных волн в преломляющей среде. Использование светодальномеров-рефрактометров дает наиболее точные результаты по сравнению с другими методами. К сожалению, эти инструменты пока не получили широкого распространения в практике высокоточных геодезических измерений.

В разделе 1.2 дается краткий обзор метеорологических методов введения метеопоправки. В первую очередь, сюда относится стандартный метод, при котором значение среднеинтегрального показателя преломления  $\bar{n}$  принимают равным среднему арифметическому из величин  $n_1$  и  $n_2$ , определяемых по метеоизмерениям в крайних точках трассы. Такой подход неявно предполагает равномерность изменения  $n(s)$  вдоль трассы, что во многих приложениях оправдано для расстояний менее 5 км.

Основное внимание уделено методам, в которых на основе представления атмосферы упрощающими моделями различной сложности различными авторами делаются попытки учесть неравномерный характер

распределения метеопараметров вдоль линии и, располагая метеонаблюдениями лишь в ее конечных пунктах, получить приближенное к реальным условиям значение  $\bar{n}$ .

В разделе 1.3 уделено внимание геодезическим методам учета атмосферного влияния, которые дополняют определения метеопараметров в точках стояния дальномера и отражателя оценкой вертикальных градиентов показателя преломления по измерениям рефракционных углов.

В разделе 1.4 излагаются основы корреляционных (динамических), методов учета влияния атмосферы на геодезические светодальномерные измерения, разработанных В.В. Виноградовым. Их основой является выделение из рядов наблюдений таких подмножеств, для которых существует тесная корреляционная связь между двумя парами из трех измеряемых величин  $D - \gamma$  и  $N - \gamma$ , где  $D$  — оптическое расстояние,  $N$  — индекс коэффициента преломления,  $\gamma$  — точечный градиент температуры (в других вариантах вместо градиента температуры  $\gamma$  используется полный рефракционный угол  $\sigma$ , рефракционный угол  $\zeta$  или зенитное расстояние  $z$ ). Для каждой пары строится уравнение линейной парной регрессии, что позволяет редуцировать величины  $D$  и  $N$  на условия адиабатического равновесия атмосферы, при котором градиент температуры принимает значение  $-0,0098^\circ K m^{-1}$ .

Преимуществом этого метода является исключение необходимости анализа характеристикстилающей поверхности и происходящих в атмосфере физических процессов, информация о влиянии которых получается непосредственно из анализа временных рядов измеряемых величин. Полевые исследования показали, что этот метод позволяет достичь точности  $5 \cdot 10^{-7}$ .

Недостатком корреляционного метода является необходимость использования лишь части измерений, характеризующейся одновременным наличием тесной корреляционной связи между парами величин  $D - \gamma$  и  $N - \gamma$ .

Задачей диссертационной работы является развитие динамического метода, направленное на устранение указанного недостатка, что позволяет получать надежные результаты на полных рядах измерений.

Во второй главе "Применение аппарата регрессионного анализа для определения метеопоправки" теоретически обосновывается применимость аппарата регрессионного анализа для обработки геодезических светодальномерных измерений.

В разделе 2.1 излагается основная идея метода.

Связь между измеренной оптической дальностью и индексом коэффициента преломления (ИКП) имеет известный вид:

$$D = D_0 - \frac{D_0}{n_0} \bar{N} \cdot 10^{-6} \quad , \quad (1)$$

где  $D_0$  — геометрическая дальность,  $D$  — оптическая дальность,  $\bar{N}$  — среднеинтегральное значение ИКП  $N$ ,  $n_0$  — коэффициент преломления воздуха при нормальных условиях.

Обычно на практике ИКП определяется из измерений метеопараметров на двух концах трассы — у дальномера и отражателя, — или даже на одном. При этом фактические его значения в промежуточных точках световой кривой, определяющие среднеинтегральное значение

$$\bar{N} = \frac{1}{D} \int_0^D N(s) ds \quad , \quad (2)$$

неизвестны.

Не вызывает сомнения утверждение, что с течением времени характер распределения метеопараметров вдоль светового луча претерпевает изменения, и в соответствии с (2) не остается постоянным среднеинтегральный ИКП, что согласно (1) эквивалентно изменению измеренной дальности. Одновременно изменяются различные параметры, которые можно измерить на концах трассы. Благодаря этой одновременности можно на некоторый период времени установить функциональную связь между  $\bar{N}$  и некоторым числом  $k$  доступных определению параметров  $\xi$  (что равносильно связи между измеренным расстоянием  $D$  и этими параметрами):

$$D = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad .$$

Не делая предположений о физическом характере такой зависимости и допуская существование первых производных функции  $f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$  по каждому параметру  $\xi_i$ , прибегнем к ее линеаризации путем разложения в ряд Тэйлора в окрестности некоторого значения

$$\bar{D} = f(\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_k)$$

при удержании членов первого порядка:

$$D = \bar{D} + \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial \xi_i} (\xi_i - \tilde{\xi}_i). \quad (3)$$

Для решения уравнения (3) необходимо решить две проблемы:

- обеспечить нахождение числовых значений частных производных в (3);
- выбрать такой набор значений ряда параметров  $\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_k$ , для которого может быть найдено значение  $\tilde{D}$  путем строгого решения уравнений (2) и (1).

Нахождение частных производных на наборе дискретных значений заменяется вычислением коэффициентов множественной линейной регрессии  $\hat{b}_{Di}$  в процессе решения уравнений (3), которые принимают вид:

$$D = \tilde{D} + \sum_{i=1}^k \hat{b}_{Di}(\xi_i - \tilde{\xi}_i). \quad (4)$$

Для решения проблемы выбора параметров  $\xi$  необходимо прибегнуть к рассмотрению физической сути происходящих в атмосфере процессов. Известно, что вблизи моментов изотермии атмосферы вертикальный градиент температуры приобретает в широком диапазоне высот значение  $\gamma = -0,0098^\circ K m^{-1}$ . Это позволяет для условий, близких к изотермическим, принять простую модель атмосферы, характеризующуюся следующими условиями:

1. любая поверхность равной оптической плотности является геометрическим местом точек, расположенных на одной абсолютной высоте;
2. в небольших интервалах абсолютных высот вертикальный градиент оптической плотности можно считать постоянным.

Следуя подходу, описанному в разделе 1.4, примем в качестве исходного набора такие значения доступных определению параметров  $\{\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_k\}$ , которые соответствуют изотермическим условиям. При этом автор данного исследования придает этим условиям более широкий смысл. За основу расчета величин  $\tilde{\xi}_i$  следует принять среднесуточные значения основных метеопараметров, а также градиенты их, соответствующие распределению свободной атмосферы.

Наиболее сложной частью решения нашей задачи является нахождение  $\tilde{D}$  — длины оптического пути при упомянутых условиях. Оно основано на решении уравнений переноса электромагнитного излучения в рамках принятой модели атмосферы, которое можно методически разделить на две части:



- определение формы траектории переноса ЭМВ;
- вычисление среднеинтегрального вдоль этой траектории ИКП.

В разделе 2.2 описаны условия, при которых решалась задача нахождения  $\tilde{D}$ .

В разделе 2.3 приводится вывод уравнений Эйлера переноса электромагнитного излучения в преломляющей среде для изложенных выше условий.

$$\frac{dc_i}{ds} = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial x_i} - c_i \frac{dn}{ds} \right), \quad (i = 1, 2, 3). \quad (5)$$

Раздел 2.4 представляет собой обзор формул, связывающих фазовый показатель преломления воздуха с длиной волны оптического излучения — дисперсионные формулы — и с основными метеопараметрами. Отмечается, что в настоящее время в рефрактометрии наиболее точной в широком диапазоне атмосферных условий считается формула Оуэнса.

Раздел 2.5 посвящен коэффициенту земной рефракции и определению формы рефракционной кривой вблизи условий изотермии. Коэффициент рефракции определяется как отношение радиуса кривизны земной поверхности  $R_\oplus$  и радиуса кривизны траектории светового луча  $\rho$ :

$$k = \frac{R_\oplus}{\rho}. \quad (6)$$

Зависимость коэффициента рефракции  $k$  от коэффициента преломления воздуха находится из решения уравнений Эйлера в известном виде

$$k = -\frac{R_\oplus}{n} \frac{dn}{dh} \sin z, \quad (7)$$

где  $R_\oplus$  — радиус кривизны земной поверхности,  $n$  — показатель преломления воздуха,  $\frac{dn}{dh}$  — величина градиента  $n$ ,  $z$  — угол между нормалью к поверхности равных  $n$  и касательной к траектории светового луча.

В рамках адиабатической модели атмосферы, вводимой в разделе 2.1, градиент  $n$  является вертикальным и постоянным вдоль траектории светового луча, а угол  $z$  принимает смысл зенитного расстояния. Кроме того, для трасс с малыми наклонами углы  $z$  близки к  $90^\circ$ , и их изменение вдоль траектории практически не влияет на величину  $\sin z$ , которая остается близкой к единице. Благодаря этому отношение (7),

справедливое для точки, можно распространить на всю трассу. Форма световой кривой становится близка к круговой, а кривизна ее может быть определена по коэффициенту рефракции (7) после замены зенитного расстояния  $z$  средним углом наклона траектории к вертикали  $i$ .

В разделе 2.6 решается задача определения среднеинтегрального по световой кривой индекса коэффициента преломления  $\bar{N}$  в условиях изотермии. Вводится вспомогательное математическое понятие опорной кривой как линии, вдоль которой ИКП изменяется равномерно от начала к концу трассы. Это позволяет разделить среднеинтегральное значение ИКП на две составляющие:

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{1}{D} \int_0^D \Delta N(s) ds, \quad (8)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — значения ИКП в конечных точках трассы,  $\Delta N$  — отклонение ИКП в некоторой точке рефракционной кривой от значения, определяемого линейным по  $s$  законом.

Вводя обозначение для интеграла

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{D} \int_0^D \Delta N(s) ds, \quad (9)$$

получим среднеинтегральный ИКП в виде

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2} + \Delta \bar{N}. \quad (10)$$

Таким образом, в условиях изотермического состояния атмосферы задача определения  $\bar{N}$  сводится к нахождению поправки  $\Delta \bar{N}$  к значению, определяемому стандартным методом.

Подраздел 2.6.1 посвящен определению формы опорной кривой, проходящей через конечные точки трассы, вдоль которой ИКП изменяется равномерно, т.е.

$$\frac{dN}{ds} = \text{const} = \frac{N_2 - N_1}{D}. \quad (11)$$

Если бы световой луч распространялся вдоль этой кривой, то среднеинтегральный ИКП равнялся бы среднему арифметическому из значений на концах трассы  $N_1$  и  $N_2$ . Величина  $\Delta N$  может интерпретироваться как разность между ИКП в текущей точке траектории переноса ЭМВ и в соответствующей ей точке-образе на опорной кривой.

Получено выражение, связывающее радиус кривизны опорной линии  $r'$  и радиус кривизны поверхностей равных ИКП  $r$ :

$$\frac{1}{r'} = \frac{\sin i}{r} \quad , \quad (12)$$

где  $i$  — средний угол наклона световой траектории к вертикали. Таким образом, в условиях адиабатического равновесия атмосферы опорная линия имеет форму, близкую к круговой.

По аналогии с коэффициентом земной рефракции можно ввести коэффициент

$$q = \frac{R_{\oplus}}{r'} = \frac{R_{\oplus}}{r} \sin i \quad .$$

При условиях, принятых для адиабатической атмосферы, радиус кривизны поверхностей равной оптической плотности будет отличаться от радиуса кривизны земной поверхности на величину  $H$  их высоты над уровнем моря:

$$r = R_{\oplus} + H \quad ,$$

следовательно

$$q = \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + H} \sin i \quad , \quad (13)$$

что для горизонтальных трасс близко к единице.

В подразделе 2.6.2 для величины  $\Delta N$  получено выражение

$$\Delta N = \frac{n \cdot 10^6}{\rho} \Theta \quad , \quad (14)$$

где  $\Theta$  — расстояние между точкой на траектории и ближайшей к ней точкой на опорной кривой.

Подраздел 2.6.3 посвящен вычислению интеграла (9) вдоль траектории световой кривой

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{D} \int_0^D \Delta N(s) ds = \frac{n \cdot 10^6}{D \rho} \int_0^D \Theta(s) ds \quad . \quad (15)$$

Поскольку в условиях изотермии траектория светового луча и опорная кривая представляют собой дуги окружностей, лежащих в одной вертикальной плоскости, можно перейти от интегрирования по линейному параметру  $s$  к интегрированию по центральному углу  $\alpha$ :

$$\Delta \bar{N} = \frac{n \cdot 10^6}{D} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \left( \sqrt{L^2 + \rho^2 + 2L\rho \cos \alpha} - r' \right) d\alpha \quad , \quad (16)$$

где  $L$  — расстояние между центрами кривизны световой линии и опорной кривой,  $\alpha$  — угол между направлениями из центра световой кривой на середину дуги и на текущую точку траектории,

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{D}{2\rho}.$$

Далее удобно сделать замену переменной  $u = \sin \alpha$  :

$$\Delta \bar{N} = \frac{n \cdot 10^6}{D} \int_{-D/2\rho}^{D/2\rho} \left( \sqrt{L^2 + \rho^2 + 2L\rho\sqrt{1-u^2}} - r' \right) \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} du. \quad (17)$$

Последующий вывод формулы для  $\Delta \bar{N}$  основан на разложении подкоренных выражений в ряды, получении подынтегрального выражения в виде ряда по степеням  $u$  и его почленном интегрировании.

В результате автором получена величина поправки в среднеинтегральный ИКП за нелинейность изменения ИКП вдоль световой кривой в условиях адиабатического равновесия атмосферы в виде

$$\Delta \bar{N} = \frac{n \cdot 10^6}{D} \left[ (k^2 - kq) \frac{D^3}{12R_\oplus^2} + (4k^4 - k^3q - k^2q^2 - 2kq^3) \frac{D^5}{480R_\oplus^4} \right]. \quad (18)$$

Оценочные расчеты слагаемых внутри квадратных скобок показывают, что первое слагаемое достигает относительной величины  $1 \cdot 10^{-7}$  для линий длиной около 20 км. Второе слагаемое что приближается к величине  $1 \cdot 10^{-7}$  при расстоянии порядка 6 500 км, и им можно пренебречь.

На основе (18) диссертантом получена формула для учета атмосферного влияния на измерения дальности вблизи условий атмосферной изотермии

$$D_0 = \tilde{D} + D \frac{N_1 + N_2}{2n} \cdot 10^{-6} + \left( \frac{k^2}{2} - kq \right) \frac{D^3}{12R_\oplus^2}, \quad (19)$$

в которую входят поправка (18) и известная поправка

$$\delta_r = -k^2 \frac{D^3}{24R_\oplus^2},$$

за рефракционное удлинение кривой.

Третья глава "Полевые испытания регрессионных методов" посвящена тестированию методик учета внешних условий, разработанных на основе изложенного во второй главе подхода.

В разделе 3.1 предложен ряд вариантов методики и описана общая структура алгоритма.

Варианты можно разделить на две группы в соответствии со способом получения ИКП на концах линии.

**В группе “а”** за основу определения  $N_1$  и  $N_2$  в конечных точках трассы принимается измерение значений температуры вблизи дальногомера и отражателя на стандартных высотах 2,0 м над землей, что соответствует подходу, принятому в стандартной методике.

**В группе “б”** за основу определения  $N_1$  и  $N_2$  в конечных точках трассы принимается измерение значений температуры на мачте высотой 11 м вблизи дальногомера.

В каждой группе представлены шесть вариантов методики, различающиеся выбором регрессионных параметров.

1. Линейная регрессия на  $N$ .
2. Регрессия на  $N$  и  $\gamma$ ;  $\gamma$  — градиент температуры из температурных измерений на мачте вблизи светодальногомера.
3. Регрессия на  $N$  и  $\zeta$ ;  $\zeta$  — рефракционный угол, находимый из измерений зенитных углов в точке стояния светодальногомера.
4. Регрессия на  $N$  и  $\sigma$ ;  $\sigma$  — полный рефракционный угол, находимый из взаимно обратных измерений зенитных углов в конечных точках.
5. Регрессия на  $N$ ,  $\sigma$  и  $\Delta\zeta$ ;  $\Delta\zeta$  — разность рефракционных углов, находимых из взаимно обратных измерений зенитных углов в конечных точках.
6. Регрессия на  $N$ ,  $\gamma$  и  $\Delta\gamma$ ;  $\Delta\gamma$  — разность градиентов температуры из температурных измерений на мачтах вблизи светодальногомера и отражателя.

Метеопоправка в дальность для редуцированных на нормальные условия измерений, учитывающая неравномерность изменения ИКП вдоль световой кривой и удлинение, вызванное ее рефракционным искривлением, вычисляется по формуле

$$\Delta D_m = D\tilde{N} \cdot 10^{-6} - \left( \tilde{k}q - \frac{\tilde{k}^2}{2} \right) \frac{D^3}{12R_\oplus^2} . \quad (20)$$

Величины с тильдой соответствуют условиям изотермического состояния атмосферы и вычисляются на основе среднесуточных значений основных метеопараметров и адиабатического градиента температуры.

Составляются уравнения регрессии, которые имеют вид<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} 1) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) \\ 2) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \hat{b}_\gamma(\gamma - \tilde{\gamma}) \\ 3) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \hat{b}_\zeta(\zeta - \tilde{\zeta}) \\ 4) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \hat{b}_\sigma(\sigma - \tilde{\sigma}) \\ 5) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \hat{b}_\sigma(\sigma - \tilde{\sigma}) + \hat{b}_{\Delta\zeta}(\Delta\zeta - \tilde{\Delta\zeta}) \\ 6) \quad D &= \tilde{D} + \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \hat{b}_\gamma(\gamma - \tilde{\gamma}) + \hat{b}_{\Delta\gamma}(\Delta\gamma - \tilde{\Delta\gamma}) \end{aligned}$$

В соответствии с изложенными во второй главе свойствами нормальной атмосферы следует принять  $\tilde{\Delta\zeta} = 0$  и  $\tilde{\Delta\gamma} = 0$ .

Из решения системы полученных уравнений по методу наименьших квадратов вычисляем коэффициенты регрессии  $\hat{b}_j$  и среднее по серии значение измеренного расстояния  $\tilde{D}$ , редуцированное на нормальные условия.

Геометрические расстояния по результатам каждого измерения вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} 1) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) + \Delta D_m \\ 2) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) - \hat{b}_\gamma(\gamma - \tilde{\gamma}) + \Delta D_m \\ 3) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) - \hat{b}_\zeta(\zeta - \tilde{\zeta}) + \Delta D_m \\ 4) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) - \hat{b}_\sigma(\sigma - \tilde{\sigma}) + \Delta D_m \\ 5) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) - \hat{b}_\sigma(\sigma - \tilde{\sigma}) - \hat{b}_{\Delta\zeta}(\Delta\zeta - \tilde{\Delta\zeta}) + \Delta D_m \\ 6) \quad D_{0i} &= D - \hat{b}_N(N - \tilde{N}) - \hat{b}_\gamma(\gamma - \tilde{\gamma}) - \hat{b}_{\Delta\gamma}(\Delta\gamma - \tilde{\Delta\gamma}) + \Delta D_m \end{aligned}$$

Здесь  $\Delta D_m$  определяется формулой (20).

Среднюю квадратическую погрешность определения геометрической дальности находят по формуле

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{0i} - D_0)^2}{n - K - 1}},$$

где  $K$  — принятое в методике число регрессионных параметров.

<sup>1</sup>См. (4).

В разделе 3.2 описан полевой эксперимент, проводившийся в течение 1990 года на геодинамическом полигоне Института высоких температур в Киргизии (г. Бешкек).

Дальности измерялись светодальномером "Топаз" СП2, предназначенным для эталонирования геодезических базисов.

Всего в обработку включено 1368 измерений из восьми суточных и восьми четырехчасовых серий, в которых 774 приема имеют измеренные зенитные расстояния на обоих концах трассы.

Результаты наблюдений представлены в 16 таблицах приложения.

В разделе 3.3 анализируются результаты обработки по различным вариантам методики.

По разработанным алгоритмам были составлены программы на языке Си и выполнены вычисления на персональных компьютерах типа IBM PC 80x86.

Сравнение результатов обработки светодальномерных измерений, полученных по предлагаемым методикам, с результатами двух традиционных методик показывает, что разработанная нами методика обеспечивает более высокую точность результатов. Во всех случаях новая методика обеспечивают лучшую сходимость результатов внутри серий.

Сравнение использовавшихся методик между собой показывает особенно высокую точность вариантов методики, основанных на измерениях градиента температуры. Средние квадратические отклонения дальностей, полученных по вариантам методики 2<sup>a</sup> и 2<sup>b</sup>, во всех случаях в 2–3 раза меньше отклонений в результатах стандартной методики. Кроме того, для всех линий средние по сериям из варианта методики 2<sup>a</sup> лучше согласованы между собой, чем из традиционных методик.

Преимуществом предлагаемого подхода является то, что он не требует специального выбора из наблюдательного массива таких данных, для которых удовлетворяется условие наличия связи (4).

Относительные точности для этих методик приведены в таблице 1. Лишь в одной серии — линия 4604-В, 9 февраля — оно достигает значения  $1 \cdot 10^{-6}$ , оставаясь при этом в 2,5 и 2,2 раза ниже среднего отклонения по результатам методик стандартной и ИВТ АН соответственно. В 50% серий среднее отклонение результатов варианта методики 2<sup>a</sup> составляет не более  $2,5 \cdot 10^{-7}$ . В 75% серий среднее отклонение результатов варианта методики 2<sup>a</sup> составляет не превышает  $5,0 \cdot 10^{-7}$ . Это позволяет сделать вывод о достижении точности  $5 \cdot 10^{-7}$ .

В заключении приведены основные результаты, которые сводятся к следующему:

Эк. 11111111111111111111

Эк. 11111111111111111111

Эк. 11111111111111111111

Table 1: Относительные точности методик в единицах  $1 \cdot 10^{-7}$  дальности

| Линий          | Методики |        |             |
|----------------|----------|--------|-------------|
|                | Станд.   | ИВТ АН | Регр. метод |
| 3856-A         |          |        |             |
| 8 февраля      | 14.0     | 15.2   | 6.7         |
| 17 апреля      | 5.0      | 4.6    | 2.3         |
| 25 апреля      | 4.7      | 4.6    | 1.6         |
| 10 мая         | 8.2      | 4.7    | 2.3         |
| 3858-B         |          |        |             |
| 8 февраля      | 15.5     | 16.2   | 7.8         |
| 17 апреля      | 5.7      | 5.1    | 2.3         |
| 25 апреля      | 5.0      | 5.1    | 1.7         |
| 10 мая         | 9.1      | 5.3    | 3.0         |
| 4604-A         |          |        |             |
| 9 февраля      | 24.1     | 21.4   | 7.4         |
| 28 марта       | 5.8      | 4.1    | 2.1         |
| 6 апреля       | 6.9      | 8.1    | 2.5         |
| 28 мая         | 9.2      | 6.4    | 5.0         |
| 9 февраля      |          |        |             |
| до полуночи    | 26.3     | 17.6   | 7.3         |
| после полуночи | 19.5     | 24.9   | 2.2         |
| 4604-B         |          |        |             |
| 9 февраля      | 25.1     | 22.3   | 9.7         |
| 28 марта       | 9.4      | 4.4    | 3.8         |
| 6 апреля       | 10.2     | 7.5    | 2.1         |
| 28 мая         | 8.1      | 5.5    | 4.1         |
| 9 февраля      |          |        |             |
| до полуночи    | 28.0     | 20.0   | 10.8        |
| после полуночи | 18.4     | 24.4   | 2.6         |

Эк. 11111111111111111111

Эк. 11111111111111111111

Эк. 11111111111111111111



- Получена формула рефракционной поправки в измеренную длину линии для условий адиабатического равновесия атмосферы.
- Разработана методика учета влияния внешней среды на геодезические светодальномерные измерения, использующая регрессионный анализ для редуцирования результатов наблюдений на условия изотермии атмосферы.
- Разработанная методика не требует расширения состава полевых измерений и обеспечивает точность обработки светодальномерных наблюдений  $5 \cdot 10^{-7}$ .

*Приложение 1* состоит из таблиц, в которых представлены ряды экспериментальных данных, полученные из светодальномерных и метеорологических измерений на геодинамическом полигоне ИВТ АН в течение 1990 года.

В *приложении 2* приводятся графики сравнения результатов обработки, полученных по стандартной методике, методике ИВТ АН и варианту регрессионной методики 2<sup>а</sup>, использующей регрессию измеренных дальностей на среднем ИКП и градиенте температуры  $\gamma$ .

Публикации по теме диссертации

1. Белов И.Ю. *Полевые испытания регрессионных методов учета влияния атмосферы на светодальномерные измерения.* — Казан. гос. ун-т, 1995. — Деп. в ВИНТИ: №2660-В95. — 37 с.
2. Белов И.Ю. *Применение аппарата регрессионного анализа для учета влияния атмосферы на светодальномерные измерения.* — Казан. гос. ун-т, 1995. — Деп. в ВИНТИ: №2659-В95. — 34 с.
3. Белов И.Ю. *Учет влияния атмосферных условий в работах по светодальнометрии: основные направления.* — Казан. гос. ун-т, 1995. — Деп. в ВИНТИ: №2661-В95. — 17 с.
4. Белов И.Ю., Виноградов В.В. *Исследование взаимосвязи показателя преломления воздуха с регулярной рефракцией.* // XI Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. Тезисы докладов. — Томск: Томский научный центр СО АН СССР, 1991. — с. 116.
5. Белов И.Ю., Виноградов В.В. *Экспериментальное сравнение корреляционного и модельного подходов в светодальнометрии.* // XII Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. Тезисы докладов. — Томск: Томский научный центр СО АН РФ, 1993. — с. 106.

